教学互动中师生脑间同步性及其调节因素

巩芳颖，孙逸梵，贺琴，石可，刘伟，陈宁

上海师范大学心理学院，上海 200234

摘要 教学互动是课堂教学的核心社会心理过程。本文聚焦于言语、非言语以及混合互动三种具体教学互动形式，发现元认知加工、心理理论、工作记忆、言语加工、情绪等相关脑区的协同作用构成了教学互动的神经基础。特别是人际脑间同步性(IBS)在识别有效教学互动中具有重要的神经标记物意义，且受到教学能力、教学策略、知识经验、情绪等多因素的调节。未来研究方向应侧重于细化这三种教学互动的共享和特异性神经机制，进一步考察 IBS 的其他调节因素，并在研究设计和方法拓展上凸显教学研究的生态效度，以准确反映教学实践的真实情况。

关键词 教学互动，认知神经机制，脑间同步性，调节因素

互动是人与人或群体之间发生的交互动作或反应过程(顾明远, 1998)。教学互动是一般性互动在教育教学中的具体化与语境化，是课堂教学的核心社会心理过程，深刻影响课堂氛围的塑造(张伟平 等, 2020)、学习者在教学活动中的参与度与积极性(Sun et al., 2022)以及对新旧知识之间联系的建构(彭海涛, 2021)，从而决定教学效果与教学目标的实现程度。鉴于教学互动在教学和发展中的重要意义，教学互动的质量、策略和功能等相关问题受到了研究者的广泛关注。近年来，随着认知神经科学发展和神经成像技术的进步，从脑间神经科学视角研究教学互动的神经机制成为可能。本文即从这一视角对相关文献进行梳理，探讨教学过程中师生不同类型互动的脑间同步性及其调节因素，为深入理解教学情境中的互动过程、促进互动质量提供依据。

1 教学互动中的脑间同步现象

人类的本质是社会的，社会互动在日常生活中处于核心地位(Redcay et al., 2019)。为揭示人际互动的发生机制，研究者在传统行为研究基础上，进一步采用认知神经科学手段来探秘互动过程中的大脑活动。然而，大多数脑成像研究只测量单一个体的大脑活动，虽能表征与社会认知相关的神经活动，但却忽略了多个大脑之间动态信息交互。因此，为实时采集和测量两个或多个个体之间的动态行为和神经活动，多脑同时扫描这一技术已被广泛地用于研究两人或多人参与的人际互动，囊括感知与运动、信息传递与加工、思维与决策等领域(李先春 等, 2018)。

人际互动研究采用的实验范式大致可以分成三类：联合行动范式(joint action)(Novembre et al., 2016)、决策博弈范式(joint decision-making)(Ciaramidaro et al., 2018)、“发起者”和“接收者”范式(Anders et al., 2011; Smirnov et al., 2019)。综合以往研究发现，在时间、空间或频率上的大脑信号相关性或一致性——人际脑间同步性(interpersonal brain synchronization, IBS)，可以作为一个识别有效互动过程的典型神经标记物。随着脑成像技术的发展，大脑数据分析方法也随之革新，例如基于小波变换相干性(wavelet transform coherence, WTC)(Zheng et al., 2018)、皮尔逊相关系数(Holper et al., 2013)等算法计算 IBS。此外，研究者还试图使用格兰杰因果分析(granger causality analysis, GCA)来研究互动双方大脑信号间的因果关系(Pan et al., 2018)。通过 fMRI、ERP 等方法，研究者发现人际互动行为引起了包括前额叶(Bellucci et al., 2019; Zhang et al., 2020)、前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)(Špiláková et al., 2020)、眶额皮层(orbitofrontal cortex, OFC)(Zhang et al., 2020)、颞顶皮层(temporoparietal cortex)(Bellucci et al., 2019; Zhang et al., 2020)等在内的脑区激活。这些研究为教学互动神经机制的探讨奠定了知识和方法学基础。

教学涉及从教师到学习者的新颖信息的转移(Nguyen et al., 2022)。作为一种特殊而复杂的人际互动行为，教学互动是否同样会引发上述脑区的激活呢？迄今为止，教学互动的认知神经机制研究主要关注的科学问题涉及：言语互动对教学的影响，例如苏格拉底式师生对话、师生合作问题解决、课堂教学互动风格等(Holper et al., 2013; Takeuchi et al., 2019; Zheng et al., 2018)；非言语互动对教学的影响，例如师生身体同步、教师手势(Holle et al., 2008; Nozawa et al., 2019; Quandt et al., 2012; Takeuchi et al., 2017)；混合互动对教学的影响，例如师生联合合唱(Pan et al., 2018)。那么，基于不同互动形式的教学互动是否在师生脑区激活中具有共同性或特异性？下文将根据教师与学习者互动过程中信息传递的不同形式及其组合，分析师生在这些过程中大脑活动变化特征。最后，笔者从人际脑间同步的角度提出，师生教学互动可能是一个“驱动—互动同步”的过程，为揭示教学互动的潜在神经基础提供进一步的理论依据。

1.1 言语互动中的脑间同步

在教学活动中，言语互动最先受到研究者的重视，这是因为教学行为主要依赖于语言，强调语言的表达和理解能力，包括教师的讲解、提问、反馈等。这类互动也可以被称为侧重言语互动(verbal interaction)的教学互动。在实时、复杂的教学互动过程中，师生双方离不开元认知能力对自身认知过程的监控和调节(Takeuchi et al., 2017, 2019)，以及利用心智化能力来理解有关自己与他人的信息，并对他人的行为进行预测(Brockington et al., 2018; Zheng et al., 2018)。

因此，面对面言语教学涉及认知互动和元认知能力的运用。例如，教师通过元认知能力监控和调节自己的教学策略，而学习者则通过元认知能力监控学习过程并调节学习行为。这些认知过程离不开前额叶的核心作用(Holper et al., 2013; Takeuchi et al., 2019)。Holper 等人(2013)率先利用 fNIRS 技术记录了教学互动中师生双方大脑前额叶(prefrontal cortex, PFC)的活动。研究结果显示，在互动教学中，数字、算术处理等涉及认知控制的任务引发了认知加工脑区的活跃，进而激活了前额叶皮质，成功获得知识的学习者与教师在前额叶大脑活动上表现出同步现象。在另一项问题解决的实验中，教师在给出七巧板谜题提示后，其 PFC 的活性增加，收到提示后的学习者在任务解决后，PFC 活性也随之增加(Takeuchi et al., 2019)。这表明，教师和学习者的 PFC 共同参与解决问题时相关的元认知过程，较高活性的 PFC 引发更高的认知功能促进了问题解决。

其次，言语互动还涉及与心理理论相关的大脑网络，并影响了师生双方的脑间同步性(Brockington et al., 2018; Zheng et al., 2018)。例如，在互动和讲授教学中，师生在颞顶联合区(temporoparietal junction, TPJ)的脑间同步显著大于在视频教学中的表现(Zheng et al., 2018)。研究还发现，教学信息可通过言语互动诱发教师右颞顶叶交界处和学习者前颞上皮层(anterior superior temporal cortex, aSTC)脑区之间较高的人际脑间同步性，即异源脑区同步活动性增强的现象。另外，师生 IBS 增加与学习者推理测试成绩呈正相关。这说明教学互动过程，教师并非盲目地传递教学信息，而是需要对学习者心理状态进行预测，以便更有效地向学习者提问；学习者也会整合信息，以推断教师行为的意义和意图(Correia et al., 2014)。当学习者只需要接受知识传递时，则会引发师生心智化功能脑区的不对称激活(Brockington et al., 2018)。总之，师生之间的心理理论相关脑区的 IBS 反映了双方同知识相关方面的联合心理活动，与教师将知识传递给学习者的过程密切相关。

在面对面言语教学互动过程中，与情感联结有关的脑区也会激活。通过对比教学前后静息状态下脑间活动，发现教学后师生在右侧感觉运动皮层(sensorimotor cortex, SMC)的脑间同步性更强(Zheng et al., 2020)。这说明进行知识传递和沟通对话时，言语互动还能够提供情感情绪交流的信息。因此，教学互动不仅会影响师生关系，还会促进师生间建立情感纽带，体现为情感联结会随着师生脑间同步性的增强而提高，而情感的建立反过来又促进了教学互动的有效性。

除上述脑区外，言语教学互动的神经基础还包括与工作记忆及听觉语言相关的脑区(Nguyen et al., 2022)。教师进行课堂教学以及安排合理复习时，师生的脑间同步性覆盖了感觉皮层(sensory cortices)、颞上回(superior temporal gyrus，STG)和颞中回(middle temporal

gyrus, MTG)，并延伸到更高阶的后内侧皮层(posterior medial cortex, PMC)、双侧背外侧前额叶皮质(dorsolateral prefrontal cortex, DlPFC)、右侧内侧前额叶皮质(medial prefrontal cortex, MPFC)以及双侧顶上小叶(superior parietal lobule, SPL)等脑区。其中，SPL 与工作记忆中信息的操纵和编码相关(Sahan et al., 2019)。当学习者在学习新知识时，工作记忆同时加工和储存多种信息，并对已有知识进行操纵和重排。而在教学互动过程中，上述脑间同步性表明师生间创造了共享的语义知识，并在教师和学习者之间保持一致的表征。

综上所述，教学中的言语互动主要与元认知加工、心理理论、语言加工等过程密切相关。位于额叶、颞叶、顶叶、颞顶联合区、感觉皮层、运动皮层等脑区的脑间神经同步在互动过程中发挥了积极作用。

1.2 非言语互动中的脑间同步

然而，包括手势、面部表情、目光接触等一系列非语言行为的交流线索对于教学过程的影响也十分重要，本文称之为侧重非言语互动(nonverbal interaction)的教学互动。教师使用肢体语言来示范动作，或者通过面部表情和眼神来传达情感和态度，其对学习者成绩表现的影响甚至超过了通过言语进行的教学互动。Nozawa 等人(2019)考察了体态语言在教学互动的作用，结果发现，身体的同步会引起师生间 PFC 的 IBS，并对随后的师生教学过程产生影响。在有效的非言语教学互动中，教师和学习者的左侧 PFC 活动也会发生同步变化(Takeuchi et al., 2017)。与言语互动一致，PFC 在非言语教学互动中同样发挥着重要的作用，教师和学习者互动中激活认知相应的脑区神经活动，以共同完成教学过程。

实际上，最简单的交流条件——目光接触，也可构成相互反馈系统，促进互动双方间注意力共享。相对于间接凝视，双方在目光接触过程中的 PFC 激活增强(Piazza et al., 2020)，互动双方的人际脑间同步性也更强(Leong et al., 2017)，在行为上表现为发送者可以预测接收者随后的注意力(Wass et al., 2018)。此外，更近的空间距离和更直接的目光接触可以诱导双方在 dlPFC 的人际脑间同步(Wang et al., 2022)，促进协作行为及沟通效率。此外，面部表情的识别也是人际互动影响因素之一。当接收者观察面部表情时，发送者的颞叶、额叶以及运动皮层的大脑活动强度(Hirsch et al., 2023)可以预测接收者特定情绪时的脑区激活(Anders et al., 2011)。然而，在目前的教育研究中，利用超扫描技术探究目光接触和面部表情内容的实证数据仍相对缺乏，未来可以拓宽关于非言语行为对教学互动的影响的研究。

还有一些研究者采用视频教学的实验设计，考察了教师手势对学习者的认知神经过程的影响。目前教学互动的手势研究主要分为两种：指示性手势和象征性手势。其中，指示性手势明确指向物体，用于具体信息的直接表达；象征性手势是强调抽象概念的表达，需伴随语

言理解其含义。Holle 等人(2008)较早对教师的象征性手势进行研究，发现该手势描述语义时激活学习者左后颞上沟(posterior superior temporal sulcus, pSTS)、双侧顶下小叶(inferior parietal lobule, IPL)等脑区。STS 在视听整合过程中的具有重要作用，而 IPL 是镜像神经系统(mirror neuron system, MNS)的核心脑区。这两个脑区的激活说明，学习者能够整合手势和语义信息，并通过观察教师手势来实现对教师行为、意图和目的的理解。后续研究表明，与指示性手势相比，教师在采取象征性手势教学时，学习者在右脑中央、顶叶和枕叶等部位的α波(8～13Hz)和β波(14～29Hz)的振幅降低(Quandt et al., 2012)。α和β波与视觉空间注意力的分配和复杂的认识活动密切相关(He et al., 2018)，说明象征性手势相比指示性手势调动了更多的视空间注意资源参与认知活动。

进一步研究还发现，手势教学可以激活更广泛的脑区活动。例如，小脑在手势观察和学习过程中发挥着重要作用。折纸观察学习期间教师和学习者 IBS 发生在小脑区域，IBS 的提高与学习者随后更好表现相关(Kostorz et al., 2020)。此外，错误手势教学对于师生脑间同步性也有影响。当言语内容与教师手势指向物体不一致时，激活学习者左侧额下回(inferior frontal gyrus, IFG)和双侧后颞中回(posterior middle temporal gyrus, pMTG)。这些区域在言语和概念匹配中发挥重要作用(Peeters et al., 2017)，暗示学习者需要更多的认知资源来完成与手势不匹配的学习任务。相对地，当教师有效运用手势时，学习者的前额叶 θ 波以及枕区和顶区 α 波(10—12 Hz)能量降低(Pi et al., 2021)。前额叶θ波的降低与认知负荷的减少有关，枕叶和顶叶区域的高频α波降低说明对视觉注意力相关的认知负荷减少(Emami & Chau, 2020)。因此，教师的手势能够帮助学习者聚焦关键信息，促进其在时空维度上的信息整合。学习者对双通道信息的加工不仅未受到信息过载的影响，反而减少了对工作记忆的表征需求、降低了认知负荷，学习者的学习效率因而得以提升。

不过，非言语互动引起的脑间同步性是否来源于共享的感觉输入和行为模式所引发的大脑活动的相似？IBS 是互动的神经基础，还是仅仅作为附带现象存在？排除共同感官输入和相同行为的影响非常重要。研究者在动物研究中发现：相比基于自然环境发声的蝙蝠，经过发声训练的蝙蝠的单个神经元活动被重组，导致大脑间同步性消失(Rose et al., 2021)；而通过多元统计模型忽略小鼠互动中所有可观察行为，其脑间同步现象依然存在(Kingsbury et al., 2019)。这些研究证实，脑间同步性是社会互动行为的固有特征，并非仅依赖于共享的感觉输入和行为模式。此外，积极的非语言行为可以在不同层面诱导神经活动一致性，包括低水平的视觉脑区、信息理解脑区以及高层次的非言语区域，这为教学和互动交流提供了共享的神经基础。总之，与非言语教学相关的脑区可能包括了额叶、颞叶、枕叶、感觉皮层、运动

皮层等，依不同的实验任务而有所变化。当前关于非言语互动教学认知神经机制的研究大多仍局限于单脑，未来可以深入考察非言语教学互动的多脑基础。

1.3 混合互动中的脑间同步

混合互动(mixed interaction)是指在教学过程中，研究对象并不仅局限于言语或者非言语的单一行为，而是关注在言语表达的同时伴随着面部表情、动作手势等非言语表达方式的互动行为。这种行为更接近真实教学情境，具有更高的生态效度，因此实验结论具有更高的理论意义与实践价值。现有研究多关注游戏、唱歌以及乐器演奏等互动过程中的协调合作，并发现额叶在混合互动中的作用更加明显。双侧额下回(inferior frontal cortex, IFC)是大脑的关键语言中枢(Lee et al., 2021)，例如教师和学习者对音乐相关句法的处理和识别就引起 IFC 的神经活动。一项研究对比了整体教授法和部分教授法中 IFC 在师生脑间的人际同步情况(Pan et al., 2018)。结果发现，“部分学习”互动次数更多、学习结果更好，还会引发师生间 IFC 的同步现象。IFC 也是镜像神经系统的重要枢纽(Iacoboni & Dapretto, 2006)。这说明学习者能够将感知到的一系列动作映像整合到自己的运动表征中，帮助自己最佳地预测教师行为、模拟教师的思想及意图并由此促进教学互动。因此，在歌唱互动期间，IFC 的人际大脑同步现象在学习者观察教师示范时效应最强，并且与学习结果显著相关。这与梅耶多媒体学习认知理论观点一致，即任何同时利用处理信息的双通道(视觉-图像、听觉-语言)的教学都会对学习有益(Mayer, 2005)。

新近研究发现，外源性师生间大脑同步振荡活动也能增强互动学习。Pan 和 Novembre 等人(2021)开发了一项双脑刺激(dual brain stimulation)技术，利用经颅交流电刺激(transcranial alternating current stimulation, tACS)同时向教师和学习者的头颅传递同步电流。当刺激额叶下部区域且教师和学习者之间 6 赫兹的交流电同相时，师生双方表现出自发性运动同步，并且这种刺激还会促进学习成绩的提高。该研究为互动障碍或者学习困难的改善提供了新思路，未来可以采用经颅交流电刺激增强人际脑间同步性，进而提升学习者的表现。

综上所述，额叶在混合互动形式的教学互动中发挥着重要作用，外源性 IBS 对教学互动也具有重要意义。目前，混合互动条件下教学互动脑机制的研究数量尚显不足，但该情境更符合真实课堂教学，因而具有较高的生态效度，预示着未来研究的广阔前景。

1.4 脑间同步与行为表现

教学互动与行为的关系主要通过学习成绩与学习表现体现。学习成绩可以通过教学前后知识差异(Davidesco et al., 2023; Nguyen et al., 2022; Takeuchi et al., 2019; Zheng et al., 2018)、完成测验的成功率(Peeters et al., 2017)或反应时(Pi et al., 2021)来量化。有效的教学互动可以

促进学习者学习成绩的提高，降低测验反应时，提高测验正确率。

其他教学和学习行为测量还包括学习者的个体特征、教师的个体特征和教学互动。学习者的特征，如学习者自我认定的注意力、加入群体的倾向等被报告与学习者群体 IBS 呈正相关(Dikker et al., 2017)，而自我描述的认知负荷也与脑区激活有关(Pi et al., 2021)。对于教师来说，更高的观点采择能力和教学能力有助于促进师生人际脑间同步性(Sun et al., 2020)。与教学互动相关的行为测量包括师生的情感联结(Zheng et al., 2020)、互动方式(Zheng et al., 2018)以及师生双方身体的同步(Nozawa et al., 2019)。此外，教师与学习者或学习者与学习者间的 IBS 越强，学习者的学习表现越好(Nguyen et al., 2021; Pan et al., 2018; Zheng et al., 2018)。教学互动后师生双方脑与行为建立联系，IBS 作为教学互动情景下的神经生物标志物，可能在预测学习成果方面发挥关键作用。

1.5 师生脑间同步的特异性

总体上，相较于其他人际互动模式，教学互动具有更为明确的教育性特点(叶子, 庞丽娟, 2001)。对比三种不同教学互动方式，IBS 出现在与各种任务相关的脑区。虽然研究者的实验范式不同以及基于不同理论下选择的脑区也不同，但共享的神经机制主要集中在额叶(Holper et al., 2013; Takeuchi et al., 2019)和颞顶联合区(Brockington et al., 2018; Zheng et al., 2018)。这表明教学互动的基础是共同注意及相互预测，大脑的社会认知网络共同参与理解他人的意图和情感状态。在教学互动中，信息早期输入激活了低级视觉感觉区，而高阶脑区随着时间的推移和信息的输入在整合新知识以及理解他人目的方面起到至关重要的作用。

相较于其他互动形式，非言语互动更能特异性地激活与视觉处理和空间信息有关的枕叶和顶叶。这可能是因为学习者在注意教师非言语教学互动信息时，需要启动视觉认知资源，以帮助解读体态姿势、目光接触和面部表情等非言语信号。镜像神经元系统(尤其是顶叶皮层部分)在理解他人动作意图时发挥作用，这有助于学生模仿和学习非言语行为，并最终提升学习成果。此外，是否因为仪器受限或者实验范式的限制导致言语互动教学相关研究没有关注到枕叶的脑区活动尚不可知，这意味着未来需要进一步探究言语互动和非言语互动的特异性。混合互动更明显地激活了与语言产生和运动理解相关的高级脑区——IFC(Pan et al., 2018)，这在一定程度上印证混合互动是更为完善和复杂的教学形式。混合互动对言语和非言语线索进行多模态信息整合，需要大脑中的多个区域协同工作以处理来自听觉和视觉通道的信息。这个过程要求更高的注意力和执行功能，以同时处理多种类型的信息并做出相应的反应。与之相比，虽然侧重言语互动的教学激活了与心理理论、情绪情感相关的脑区，但由于混合互动形式的数量限制，二者的特异性神经机制同样有待深入研究。

1.6 师生脑间同步与“驱动-互动同步”

上述脑区在教与学的互动中具有不同的功能，揭示了不同教学互动过程发生发展机制。IBS 可能反映了教师与学习者在神经层面上高效交流的独特机制：通过构建一个深度共享的知识表征，双方能够实现有效的协调和成功的互动。因此，教学互动中共同注意和相互预测是师生脑间同步性的关键。脑间同步性源于两个神经元群：编码自我行为神经元群和编码他人行为神经元群(Kingsbury et al., 2019)。师生双方能够通过对自己和对方行为的预测编码，形成共享的认知表征。实现脑间同步现象，需要个体能够快速准确地预测同伴，而这与个体整合自我和对方信息的程度有关(杨明, 何蔚祺, 2024)。例如领导者能够通过预测自己和追随者之间的交流行为，在正确的时间说正确的话(Jiang et al., 2015)。当双方地位存在差异时，同步性取决于编码他人行为的神经元回路，主导者更强烈地驱动大脑间同步性(Kingsbury et al., 2019)。互动双方的整合程度也被称为自我—他人重叠。重叠程度越高，个体越愿意从他人的角度看问题，处理来自他人的信息越快越准确，也越容易对他人产生共情，有助于脑间同步性的形成。前额叶皮层和颞顶联合区通过编码自己和他人的行为表征，这可能是构成脑间同步与自我—他人重叠共同的神经基础(Zheng et al., 2018)。

Burgess(2013)将“驱动—互动”同步描述为：驱动同步(一方随着另一方变化)和互动同步(两者相互影响达到平衡)。本文试图通过自我—他人重叠理论来深化对教学互动脑间同步性的认识。例如，自我—他人重叠能够促进师生目标和认知一致性的建立。首先，学生倾向于采纳那些与他们已有知识体系相符合的新信息，当教师的教学内容与学生的认知框架相匹配时，学生更容易接受并同步教师的教学节奏(Holper et al., 2013; Takeuchi et al., 2019)。其次，在情感重叠的背景下，个体间的信息交流能够实现同步互动。情绪感染的校正假设为我们提供了一种理解，即人们会调整自己的行为和态度，以纠正可能存在的偏差(Wróbel & Imbir, 2019)。在特定的社会环境中，个体更倾向于模仿那些与自己关系更为密切的人的情绪表达(Bizzego et al., 2020)。当面对希望建立联系的互动对象时，个体的反思性目标(即与对方建立亲密关系)与冲动性目标(即自然地模仿对方)是一致的，无需对模仿行为进行调整，这两种模式相互增强，即学习者与教师之间的社会关系越紧密，师生脑间同步性越高(Bevilacqua et al., 2018)。然而，当面对敌对或不友好的对象时，回避模仿与自动激活的模仿行为之间存在冲突，此时大脑会尝试通过自上而下的神经活动调整来阻止这种无意识的模仿行为。通过社会情感联结，个体之间会同步进行身体运动、注视行为、心理过程和神经活动(Feldman, 2017)。教师和学习者还可以通过情感调节来建立情感“共享空间”，减少双方大脑间的信息延迟(Anders et al., 2011)。

值得注意的是，互动本身要求个体监控双向反应，这势必需要调动更多的认知资源。但是，根据前文总结发现，互动式学习的结果表现更佳(Pan et al., 2018)。这可能是因为师生双方行为、意图的吻合很大程度上决定了互动式学习的效果。因此，从脑间同步的角度来看，师生教学互动更可能是“驱动—互动同步”的过程。以师生的共同参与为前提，在教学开始阶段，教师依靠其教学能力和教学风格占据课堂主导权，以知识导向为主的教学稳定驱动学习者大脑神经过程，最终使其与教师的大脑形成同步；在教学深入阶段，学习者积极主动参与知识建构，教学在运动、情感以及认知层面达到一致性，行为协调及相互理解弱化教师主导者身份，教师和学习者大脑网络相互作用、相互影响, 最终达到同步平衡状态。教学互动同步既可以维持在驱动同步，也可以向互动同步转变。在师生达到同步平衡的状态后，知识或技能的传递将会更加灵活、有变通性，也将更利于师生之间的平等对话与共同学习。

2 教学互动中脑间同步性的影响因素

目前，教学互动中脑间同步性的调节机制仍有待深入探讨。教学作为一种多形式、多内容、多维度的互动系统，教师的个体差异、教育教学模式、对学习者的期望与评价以及学习者自身的个性特征(叶子, 庞丽娟, 2001)等因素在影响教学互动质量和互动结果的同时，是否会特异性激活某些脑区?基于以往研究，从师生双方互动的视角来探讨哪些因素可能调节师生互动的过程也是一个重要课题。本节将聚焦教师教学能力、教学策略、知识经验，以及学习者的先验知识、情绪情感以及跨文化因素，考察互动双方大脑活动的变化，以揭示影响脑间同步性的影响因素。

2.1 教学能力影响脑间同步

教师的教学能力在感知、解释和管理课堂教学中都会起到重要的作用。研究发现，在专家型教师的课堂互动中，学习者的高阶思维活动类型更加丰富(马静 等, 2023)。这可能是由于专家型教师的专业思维的敏捷性以及先前获得的知识增强其认知优势，使得他们在教学互动中表现得更出色(Wolff et al., 2015)。相比新手教师，专家教师可以监控更多的领域(Stahnke et al., 2021)，并且更能关注学习者的学习和教学环境。这种认知优势不仅体现在行为实验中，还在脑间同步性研究中得到了验证。有研究者通过合作教学范式，探究了教学经验对教学互动产生影响的神经机制。结果发现，教学能力更佳的专家型教师和学习者之间，位于左侧背外侧前额叶皮质的人际脑同步性增加(Sun et al., 2020)。不仅如此，专家型教师的观点采择能力较新手教师更强，因此在互动时，与心理理论相关脑区的师生脑间同步性也更强。这一现象可以用 De Jaegher 等人(2016)提出的互动脑假说(Interactive Brain Hypothesis, IBH)解释。该

理论认为，教师先前获得的知识和技能会影响后续的教学互动过程中学生个体的认知神经过程，进而影响教师与学习者之间的脑间同步程度。由此可见，专家型教师更加突出的教学能力，不仅是师生互动过程中与新手型教师的差异来源，同时也可能是调节学习过程的重要影响因素之一。

2.2 教学策略影响脑间同步

不同的教学策略同样会影响师生互动模式和学习者的学业成绩。Pan 等人(2020)对比了两种教学策略下的师生脑间同步性：一组教师采取脚手架策略，提出关键问题或者通过提示来引导学习者讲出概念意义；另一组教师采取解释策略，直接向学习者解释概念并举例说明。结果显示，采取脚手架策略的教师更好地驱动了脑—脑的同步，与学习者在 PFC 和 STC 出现更强的脑间同步。这表明，教学互动过程能够主动地建构师生的知识体系，并形成对教学内容的理解，进而引发更加有效的学习。嗣后的一项研究发现，当教师采取精细反馈策略(提供正确答案及范例)而非简单策略(仅提供正确答案)时，教师和学习者在额顶区域(frontoparietal regions)的神经同步显著增强(Zhu et al., 2022)，包括中央后回(postcentral gyrus, PoCG)、顶上回(superior parietal gyrus, SPG)、额上回(superior frontal gyrus, SFG)以及额中回(medial frontal gyrus, MFG)。上述发现主要是由教师与学习者互动期间教师所采取的脚手架行为及精细反馈策略驱动的。教师采取建设性引导策略的积极作用也符合 Chi 等人(2014)提出的交互式—建构性—主动—被动(interactive—constructive—active—passive, ICAP)理论。该理论认为，相比被动地从教师那里获取知识，学习者从教师指导中主动地理解知识需要更多的双向交流，这也得到了上述脑间同步研究的实证支持。因此，互动式的教学策略可以更有效地激活师生间的脑间同步性，更有利于学生的认知建构和知识获得。

2.3 先验知识影响脑间同步

先验知识和经验可以提高学习者检索重要学习信息的效率，并帮助学习者构建更有效的互助策略(姜雪　等, 2022)。先前研究表明，拥有先验知识的学习者与教师互动时会建立更多的目光接触、点头同步，这不仅满足教师期望，同时还会影响到教师的行为、鼓励教师采取更多的非语言行为，进而提高面对面讲座任务中师生之间的沟通效率(Thepsoonthorn et al., 2016)。Liu 等人(2019)通过两种学习材料操控学习者的知识状态：先验知识组教授概率论的条件概率和非先验知识组教授期权理论。结果证实，在面对面互动条件下，具有先验知识的学习者与教师在 PFC 上观察到 IBS 的增强。这表明，当学习者拥有与新内容有关的先验知识时，他们会有更好的准备状态，增强对课堂的注意力以及同教师的互动交流。此外，Sun 等人(2021)发现，当拥有更多社会经验的老师和学习者共同完成合作绘画任务时，师生组合

比生生组合的成绩更好，并且在额极皮层(frontopolar cortex, FPC)观察到了脑间同步现象。综上所述，学生的先验知识在教学互动中都发挥着至关重要的作用。

2.4 情绪情感影响脑间同步

课堂上的情绪对学习者和教师都是至关重要的。情绪能够增强主体间大脑活动的同步性，从而调整不同个体的特定大脑网络，以支持对世界的感知、体验和预测(Nummenmaa et al., 2012)。具体到教学互动中，教师和学习者之间的脑间同步会随着学习者的参与度和对教师的喜爱程度而变化：学习者与教师的社会关系越密切，二者间的脑间同步性越高(Bevilacqua et al., 2018)。脑间同步性不仅可以表征互动双方间认知信息的共享行为，还能捕捉到与情绪相关的信息。有研究者通过睡眠剥夺(sleep deprivation, SD)揭示了情绪受损对教学互动的影响：当学习者在经历睡眠剥夺后，其学习表现较差；但在教师指导与互动学习后，成绩得以改善，并且学习者和教师在 IFC 表现出更大的脑间同步性，这种同步性还能够预测学习者在推理测试中的表现(Pan, Guyon, et al., 2021)。研究发现，睡眠不足正向预测学习者的负性情绪(张鹏程 等, 2023)，影响面孔情绪加工的不同方面(雷旭 等, 2024)。因此，IBS 被认为能够捕捉互动双方间情绪信息的分享(Nummenmaa et al., 2012)。虽然睡眠剥夺会影响对他人情绪的识别和分类能力，导致移情能力和个体自我感知的情绪智力的降低(Guadagni et al., 2014)，从而阻碍教师和学习者之间的交流，但教学互动过程的协调和整合能够补偿睡眠剥夺后的学习状态。此外，教师可能在推动教学和睡眠剥夺学习者脑间同步性中起着主导作用。

2.5 文化影响脑间同步

目前，跨文化背景对脑间同步性调节的影响仍处于起步阶段。相较于西方文化，东方文化更加强调社会联系，更重视与他人和谐相处以及集体目标的实现。研究发现，跨文化背景影响互动双方脑间同步程度(Lim et al., 2024)。例如，对比新加坡参与者(东方文化背景)与意大利参与者(西方文化背景)，仅意大利参与者的同步性可以通过性格因素预测。这可能是由于西方个体神经动态更具特殊性，而东方个体神经动态则更为相似(Xu et al., 2023)。尽管当前尚无研究直接对比东西方文化与师生脑间同步性之间的关系，但相关文献指出，文化与同步性的关系值得进一步研究。

2.6 小结

教学互动是一个动态、双向过程，需要教师根据学习者的即时反应进行调整，以及学习者根据教师的知识传递进行协调。这一过程涉及到相关脑区的快速响应，包括教师评估学习者的理解程度和知识状态、学习者整合和理解知识(工作记忆)、教师调整教学策略、学习者

对自己认知过程的监控和调节(元认知加工)，并以适当的情绪状态进行交流(情绪加工)。因此，脑间同步性的调节要素可能涉及到认知和情绪加工的动态交互。例如，教师的情绪状态可能会影响其教学策略的选择，进而影响学习者的工作记忆和言语加工等脑区的活动。而当学习者感到焦虑或沮丧时，其注意和记忆可能会受到影响，此时教师也可以通过情绪调节帮助学习者保持最佳学习状态。

现如今，教育发展逐渐转向以提高质量和优化结构为核心的内涵发展新阶段(钟秉林, 王新凤, 2019)。教师应如何适应不断变化的教育需求，以最大化教学成果？从教学策略来看，应采用互动式教学，鼓励学生积极参与课堂讨论和实践活动，促进师生之间的思维同步(Pan et al., 2020)；从教学能力来看，教师要通过专业培训，不断更新和扩展自己的教学方法和学科知识、与学生建立有效地知识同步(Sun et al., 2020)；从先验知识来看，教师应当评估并分析学习者的先验知识水平、将学习者已有知识框架与新知识相连接，以增强学习过程中的认知同步(Liu et al., 2020; Sun et al., 2021)；从情绪情感来看，应在教学中融入情绪元素，帮助学习者识别和管理自己的情绪，创建和谐的课堂环境，增强师生情感同步(Pan, Guyon, et al., 2021)。通过以上方式，师生同步性将在优化教学过程中发挥作用，推动教育质量的持续提升。

同时，随着现代技术的不断发展，同步性的监测和应用有望成为提高教学效果的重要手段。脑机接口(brain-computer interface, BCI)的出现将神经活动转化为可视化信息，提供大脑与外部世界通信和控制的可能(Song et al., 2022)。BCI 可以通过标记脑电信号来解读个体注意力状况、情绪状态以及身体功能等深层信息。基于此，教学互动中教师和学习者能更好地关注彼此，并真实地感受到对方的情绪，从而创造一个更加真实和有效的学习环境。因此，BCI 技术与 IBS 的组合应用，能够更加全面地检测和反映课堂中师生大脑状况。其中，神经反馈作为关键环节显示出巨大潜力。Dikker 等人(2021)发现，脑—脑同步的视听反馈能显著提升脑间耦合效应。基于这些重要发现，学习者通过参与持续的神经反馈建立稳定的注意力状态，借助 BCI 技术还能够将其认知活动、意图和对刺激的反应等反馈传达给教师，以改善教学效果(Krell et al., 2019)。尽管神经反馈技术的有效性和实践性仍在探索当中，但其研究前景十分广阔。

3 总结与展望

与其他社会情境中的人际互动相似，IBS 同样能够作为教学互动典型的神经标志物，但同时也表现出一定的教学情境特殊性：一方面，元认知加工、心理理论、工作记忆、言语加

工、情绪等相关脑区的协同作用构成教学互动的神经基础，表明教学互动是一种与多心理成分有关的复杂而多元的人际互动过程；另一方面，教学互动的脑间同步性还会受到教学能力、教学策略、知识经验以及情绪情感等教育性因素的影响。基于本文的综述可知，教学互动涉及低阶和高阶大脑区域的人际脑间同步性，以及师生之间的同源和异源大脑区域的人际脑间同步性。为进一步加深对教学互动过程的认识，为基于行为观察的教学互动理论提供更多的来自认知神经方面的证据，未来研究者可以从以下几个方面着手，对教学情景下的师生互动进行更深入的探索：

第一，探究教学互动中 IBS 程度及其与行为的因果关系。基于目前的研究，IBS 很大程度上与教学行为相互影响。虽然教学行为会更大程度地对 IBS 产生影响，但二者的因果方向性仍有待进一步探讨。证明 IBS 与塑造神经或行为过程中的因果关系仍然是一项重大挑战。因此，未来的研究应该尝试了解哪些因素影响 IBS 与教学行为之间的因果方向性。对于教学互动而言，知识的可获得性在某种程度上可能对 IBS 和教学行为之间产生影响：当知识容易获得时，行为更有可能驱动 IBS，而知识难以获得的情况下，则可能导致相反的情况(Gugnowska et al., 2022)。

目前，借助非侵入性脑刺激方法(例如 transcranial direct current stimulatioin, tDCS、transcranial alternating current stimulation, tACS、transcranial magnetic stimulation, TMS)对 IBS 过程进行外源性干预，以验证教学互动与 IBS 之间的因果关系，是一个十分具有潜力的研究方向。关注增强 IBS 因素的同时探寻 IBS 的减弱的时间进程或双方脑区不对称激活的现象，将有助于进一步理解 IBS 机制。此外，本文提出的“驱动—互动同步”的脑间同步过程仍然是一个假设性的理论。在未来的研究中，可以根据任务类型及互动方式，对驱动同步和互动同步两者进行试验性的分离。例如，借助虚拟现实技术降低生理状态影响等手段，结合多样化的教学场景，考察两种同步的神经过程及其内部的转化机制。

第二，考察 IBS 的其他调节因素。上文梳理了教学互动的脑间同步性会受到教学能力、教学策略、知识经验以及情绪情感等教育性因素的影响，但事实上，还有其他更多的调节因素值得探索。从师生各自的个体因素考虑，IBS 可能受到学习者的学段、学习动机、学业情绪等以及教师的教学动机、教学风格、教学投入等影响；从人际因素考虑，师生关系、团体规模、不同成员构成(Dikker et al., 2017)对教学互动过程中脑间同步也可能带来影响。另外，还可以从情境因素来考察教学互动时长、教学环境变化(Meshulam et al., 2017)对 IBS 时空动态的影响，或者是教育数字化背景下师—机—生新型教育教学互动中的 IBS 变化。从跨文化因素角度揭示文化价值观、沟通方式对 IBS 的影响，也值得深入探讨。总之，对这些调

节因素的考察，将进一步揭示教学互动神经机制的教育特异性和 IBS 的变化条件。

第三，进一步突出研究的生态效度。以往研究大多只关注教师采取不同教学方式对学习者施加的影响和作用，并未同时考虑学习者指向教师的互动或者是学习者与学习者之间的互动等形式(Pan et al., 2018; Zheng et al., 2018; Zheng et al., 2020)。再者相关实验数据大多是在实验室环境中的短期模拟教学中收集的，与真实的课堂教学环境仍存在较大的差距。而课堂教学并非固定、一成不变的，教育场景具有不可预知性，因此非结构化的实验情景更加贴合真实课堂，更能反映师生真实的心理状态和神经活动(Nozawa et al., 2016)。在未来研究中，可以将 fNIRS–fMRI、fNIRS–fMRI–EEG 等技术融合，应用便携式和可穿戴大脑设备(Davidesco et al., 2021; Struckmann et al., 2022; Wagner et al., 2021)来捕捉有关师生双方互动中更加丰富的信息维度。在数据分析上，可以将师生对话模式、动作、表情等产生的多维数据相互融合、纳入同步性研究中，如面部表情、眼部、手部和身体运动以及生理学等数据。在范式上，可以将非结构化任务范式以及田野研究范式应用于教学互动的研究，以揭示师生脑间同步指标是否具有其普适意义。未来还可以结合教师个体同学习者群体形成的超脑网络系统(hyper–brain network)，通过整合不同神经活动测量模式的多模态实时成像等方式，更加精准地对师生互动中的脑间同步现象进行验证。这种精准度有助于提升教学互动中认知神经机制研究的生态效度，即研究结果在实际教学环境中的适用性和有效性。

此外，深入探讨不同类型的教学互动。Pan 等人(2022)提出脑间同步性可能由不同类型的社会校准引起，例如行为同步(人际运动同步)、认知同步(共同注意)和情感感染(情绪感染)。这三种类型的同步方式与本文提出的三种互动类型有重叠之处，例如言语互动可能更多涉及认知同步，而非言语互动则与行为同步相关。今后的研究可以结合这两种视角，对教学互动的类型进行新的划分，探讨不同类型的脑间同步性。最后，还应当推动教育神经科学与教学实践的有机结合、加强教师与教育神经科学专家的对话，帮助教师将脑科学研究成果纳入教学计划中受益，特别是引导脑科学专家更多地关注教育实践问题，实现教育实践与教育研究的双赢。

参考文献

顾明远. (1998). *教育大辞典*. 上海：上海教育出版社.

姜雪, 李雨佳, 张元哲, 刘畅. (2022). 先验知识差异对协同信息搜索和学习效果的影响研究. *图书情报工作*, *66*(8), 32–41.

雷旭, 白朵, 米怡祺. (2024). 睡眠剥夺对面孔情绪加工的影响——认知神经科学的视角. *四川师范大学学报(自然科学版)*, *47*(2), 143–154+140.

李先春, 卑力添, 袁涤, 丁雅娜, 冯丹阳. (2018). 超扫描视角下的社会互动脑机制. *心理科学*, *41*(6), 1484–1491.

马静, 赵文君, 曹一鸣. (2023). 基于高阶思维培养的专家与新手数学教师课堂对话比较研究. *数学教育学报*, *32*(3), 68–72+102.

彭海涛. (2021). 课堂师生互动的深度与限度. *教育理论与实践*, *41*(14), 57–60.

叶子, 庞丽娟. (2001). 师生互动的本质与特征. *教育研究,* (4), 30–34.

张鹏程, 李喜, 韩午阳, 沈永江. (2023). 睡眠不足对中小学生负性情绪的影响: 一个链式中介模型. *心理发展与教育*, *39*(3), 402–409.

张伟平, 陈梦婷, 赵晓娜, 白雪. (2020). 专递课堂中师生互动对课堂学习效果的影响——以崇阳县小学美术专递课堂为例. *电化教育研究*, *41*(8), 90–96.

钟秉林, 王新凤. (2019). 普及化阶段我国高校教学质量评价范式的转变. *中国大学教学*, (9), 80–85.

杨明, 何蔚祺. (2024). 参与式社会互动中脑间同步的自我-他人重叠机制. *科学通报*, *69*(26), 3943–3951.

Anders, S., Heinzle, J., Weiskopf, N., Ethofer, T., & Haynes, J.-D. (2011). Flow of affective information between communicating brains. *NeuroImage*, *54*(1), 439–446.

Bellucci, G., Molter, F., & Park, S. Q. (2019). Neural representations of honesty predict future trust behavior. *Nature Communications*, *10*(1), 1–12

Bevilacqua, D., Davidesco, I., Wan, L., Chaloner, K., Rowland, J., Ding, M., Poeppel, D., & Dikker, S. (2019). Brain-to-brain synchrony and learning outcomes vary by student-teacher dynamics: Evidence from a real-world classroom electroencephalography study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *31*(3), 401–411.

Bizzego, A., Azhari, A., Campostrini, N., Truzzi, A., Ng, L. Y., Gabrieli, G., Borstein, H., Setoh, P., & Esposito, G. (2020). Strangers, friends, and lovers show different physiological synchrony in different emotional States. *Behavioral Sciences*, *10*(1), 11.

Brockington, G., Balardin, J. B., Zimeo Morais, G. A., Malheiros, A., Lent, R., Moura, L. M., & Sato, J. R. (2018). From the laboratory to the classroom: The potential of functional near-infrared spectroscopy in educational

neuroscience. *Frontiers in Psychology*, *9*, 1840.

Burgess, A.P. (2013). On the interpretation of synchronization in EEG hyperscanning studies:A cautionary note. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 881.

Chi, M. T. H., & Wylie, R. (2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, *49*(4), 219–243.

Ciaramidaro, A., Toppi, J., Casper, C., Freitag, C. M., Siniatchkin, M., & Astolfi, L. (2018). Multiple-brain connectivity during third party punishment: An EEG hyperscanning study. *Scientific Reports*, *8*(1), 6822.

Correia, J., Formisano, E., Valente, G., Hausfeld, L., Jansma, B., & Bonte, M. (2014). Brain-based translation: fMRI decoding of spoken words in bilinguals reveals language-independent semantic representations in anterior temporal lobe. *Journal of Neuroscience*, *34*(1), 332–338.

Davidesco, I., Laurent, E., Valk, H., West, T., Milne, C., Poeppel, D., & Dikker, S. (2023). The temporal dynamics of brain-to-brain synchrony between students and teachers predict learning outcomes. *Psychological Science*, *34*(5), 633–643.

Davidesco, I., Matuk, C., Bevilacqua, D., Poeppel, D., & Dikker, S. (2021). Neuroscience research in the classroom: Portable brain technologies in education research. *Educational Researcher*, *50*(9), 649–656.

De Jaegher, H., Di Paolo, E., & Adolphs, R. (2016). What does the interactive brain hypothesis mean for social neuroscience? A dialogue. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *371*(1693), 1–10.

Dikker, S., Michalareas, G., Oostrik, M., Serafimaki, A., Kahraman, H. M., Struiksma, M. E., & Poeppel, D. (2021). Crowdsourcing neuroscience: Inter-brain coupling during face-to-face interactions outside the laboratory. *NeuroImage*, *227*,117436.

Dikker, S., Wan, L., Davidesco, I., Kaggen, L., Oostrik, M., McClintock, J., Rowland, J., Michalareas, G., Van Bavel, J. J., Ding, M., & Poeppel, D. (2017). Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. *Current Biology*, *27*(9), 1375–1380.

Emami, Z., & Chau, T. (2020). The effects of visual distractors on cognitive load in a motor imagery brain-computer interface. *Behavioural Brain Research*, *378*, 112240.

Feldman, R. (2017). The neurobiology of human attachments. *Trends in Cognitive Sciences, 21*(2), 80–99.

Guadagni, V., Burles, F., Ferrara, M., & Iaria, G. (2014). The effects of sleep deprivation on emotional empathy. *Journal of Sleep Research, 23*(6), 657–663.

Gugnowska, K., Novembre, G., Kohler, N., Villringer, A., Keller, P. E., & Sammler, D. (2022). Endogenous

sources of interbrain synchrony in duetting pianists. *Cerebral Cortex, 32(18)*, 4110–4127.

He, Y., Steines, M., Sommer, J., Gebhardt, H., Nagels, A., Sammer, G., Kircher, T., & Straube, B. (2018). Spatial-temporal dynamics of gesture–speech integration: A simultaneous EEG-fMRI study. *Brain Structure & Function*, *223*(7), 3073–3089.

Hirsch, J., Zhang, X., Noah, J. A., & Bhattacharya, A. (2023). Neural mechanisms for emotional contagion and spontaneous mimicry of live facial expressions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, 378*(1875), 20210472.

Holle, H., Gunter, T. C., Rüschemeyer, S-A., Hennenlotter, A., & Iacoboni, M. (2008). Neural correlates of the processing of co-speech gestures. *Neuroimage*, *39*(4), 2010–2024

Holper, L., Goldin, A. P., Shalom, D. E., Battro, A. M., Wolf, M., & Sigman, M. (2013). The teaching and the learning brain: A cortical hemodynamic marker of teacher-student interactions in the Socratic dialog. *International Journal of Educational Research*, *59*, 1–10.

Iacoboni, M., & Dapretto, M. (2006). The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nature Reviews Neuroscience*, *7*(12), 942–951.

Jiang. J., Chen, C.S., Dai, B. H., Shi, G., Ding, G. S., Liu, L., & Lu. C M. (2015). Leader emergence through interpersonal neural synchronization. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 112*(14), 4274-4279.

Kingsbury, L., Huang, S., Wang, J., Gu, K., Golshani, P., Wu, Y. E., & Hong, W. (2019). Correlated neural activity and encoding of behavior across brains of socially interacting animals. *Cell*, *178*(2), 429.

Kostorz, K., Flanagin, V. L., & Glasauer, S. (2020). Synchronization between instructor and observer when learning a complex bimanual skill. *NeuroImage*, *216*, 116659.

Krell, J., Todd, A., Dolecki, P. (2019). Bridging the gap between theory and practice in neurofeedback training for attention. *Mind, Brain, and Education*, *13*(4), 246–260.

Lee, H.-J., Cheng, S., Lee, C.-Y., & Kuo, W.-J. (2021). The neural basis of compound word processing revealed by varying semantic transparency and morphemic neighborhood size. *Brain and Language*, *221*, 104985..

Leong, V., Byrne, E., Clackson, K., Georgieva, S., Lam, S., & Wass, S. (2017). Speaker gaze increases information coupling between infant and adult brains. *PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *114*(50), 13290–13295.

Lim, M., Carollo, A., Bizzego, A., Chen, A, S., Esposito, G. (2024). Culture, sex and social context influence brain-to-brain synchrony: An fNIRS hyperscanning study. *BMC Psychology, 12*(1), 350.

Liu, J., Zhang, R., Geng, B., Zhang, T., Yuan, D., Otani, S., & Li, X. (2019). Interplay between prior knowledge

and communication mode on teaching effectiveness: Interpersonal neural synchronization as a neural marker. *NeuroImage*, *193*, 93–102.

Mayer, R. E. (2005). *Cognitive theory of multimedia learning*. New York: Cambridge University Press.

Meshulam, M., Hasenfratz, L., Hillman, H., Liu, Y.-F., Nguyen, M., Norman, K. A., & Hasson, U. (2021). Neural alignment predicts learning outcomes in students taking an introduction to computer science course. *Nature Communications*, *12*(1), 1922.

Nguyen, M., Chang, A., Micciche, E., Meshulam, M., Nastase, S. A., & Hasson, U. (2022). Teacher–student neural coupling during teaching and learning. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *17*(4), 367–376.

Novembre, G., Sammler, D., & Keller, P. E. (2016). Neural alpha oscillations index the balance between self-other integration and segregation in real-time joint action. *Neuropsychologia*, *89*, 414–425.

Nozawa, T., Sakaki, K., Ikeda, S., Jeong, H., Yamazaki, S., Kawata, K. H. D. S., Kawata, N. Y. D. S., Sasaki, Y., Kulason, K., Hirano, K., Miyake, Y., & Kawashima, R. (2019). Prior physical synchrony enhances rapport and inter-brain synchronization during subsequent educational communication. *Scientific Reports*, *9*(1), 12747.

Nozawa, T., Sasaki, Y., Sakaki, K., Yokoyama, R., & Kawashima, R. (2016). Interpersonal frontopolar neural synchronization in group communication: An exploration toward fNIRS hyperscanning of natural interactions. *NeuroImage, 133*, 484–497.

Nummenmaa, L., Glerean, E., Viinikainen, M., Jääskeläinen, I. P., Hari, R., & Sams, M. (2012). Emotion s promote social interaction by synchronizing brain activity across individuals.*Proceedings of the Nati onal Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(24), 9599–9604.

Pan, Y., Dikker, S., Goldstein, P., Zhu, Y., Yang, C., & Hu, Y. (2020). Instructor-learner brain coupling discriminates between instructional approaches and predicts learning. *NeuroImage*, *211*, 116657.

Pan, Y., Guyon, C., Borragán, G., Hu, Y., & Peigneux, P. (2021). Interpersonal brain synchronization with instructor compensates for learner's sleep deprivation in interactive learning. *Biochemical Pharmacology*, *191*, 114111.

Pan, Y., Novembre, G., & Olsson, A. (2022). The interpersonal neuroscience of social learning. *Perspectives on Psychological Science*, *17*(3), 680–695.

Pan, Y., Novembre, G., Song, B., Li, X., & Hu, Y. (2018). Interpersonal synchronization of inferior frontal cortices tracks social interactive learning of a song. *NeuroImage*, *183*, 280–290.

Pan, Y., Novembre, G., Song, B., Zhu, Y., & Hu, Y. (2021). Dual brain stimulation enhances interpersonal learning

through spontaneous movement synchrony. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *16*, 210–221.

Peeters, D., Snijders, T. M., Hagoort, P., & Özyürek, A. (2017). Linking language to the visual world: N eural correlates of comprehending verbal reference to objects through pointing and visual cues. *Neuro psychologia*, *95*, 21–29.

Pi, Z., Zhu, F., Zhang, Y., & Yang, J. (2021). An instructor's beat gestures facilitate second language vocabulary learning from instructional videos: Behavioral and neural evidence. *Language Teaching Research*, *28(5),* 1997–2005.

Piazza, E. A., Hasenfratz, L., Hasson, U., & Lew-Williams, C. (2020). Infant and adult brains are coupled to the dynamics of natural communication. *Psychological Science*, *31*(1), 6–17.

Quandt, L. C., Marshall, P. J., Shipley, T. F., Beilock, S. L., & Goldin-Meadow, S. (2012). Sensitivity of alpha and beta oscillations to sensorimotor characteristics of action: An EEG study of action production and gesture observation. *Neuropsychologia*, *50*(12), 2745–2751.

Redcay, E., & Schilbach, L. (2019). Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction. *Nature Reviews Neuroscience*, *20*(8), 495–505.

Rose, M. C., Styr, B., Schmid, T. A., Elie, J. E., & Yartsev, M. M. (2021). Cortical representation of group social communication in bats. *Science*, *374*(6566), 422.

Sahan, M. I., Majerus, S., Andres, M., & Fias, W. (2019). Functionally distinct contributions of parietal cortex to a numerical landmark task: An fMRI study. *Cortex: A Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *114,* 28–40.

Smirnov, D., Saarimäki, H., Glerean, E., Hari, R., Sams, M., & Nummenmaa, L. (2019). Emotions amplify speaker-listener neural alignment. *Human Brain Mapping, 40*(16), 4777–4788.

Song, X., Zeng, Y., Tong, L., Shu, J., Yang, Q., Kou, J., Sun, M., & Yan, B. (2022). A collaborative brain-computer interface framework for enhancing group detection performance of dynamic visual targets. *Computational Intelligence & Neuroscience*, 1–12.

Špiláková, B., Shaw, D. J., Czekóová, K., Mareček, R., & Brázdil, M. (2020). Getting into sync: Data–driven analyses reveal patterns of neural coupling that distinguish among different social exchanges. *Human Brain Mapping*, *41*(4), 1072–1083.

Stahnke, R., & Blömeke, S. (2021). Novice and expert teachers' situation-specific skills regarding classroom management: What do they perceive, interpret and suggest? *Teaching and Teacher Education*, *98*, 103243.

Struckmann, W., Bodén, R., Gingnell, M., Fällmar, D., & Persson, J. (2022). Modulation of dorsolateral prefrontal

cortex functional connectivity after intermittent theta-burst stimulation in depression: Combining findings from fNIRS and fMRI. *NeuroImage Clinical, 34*, 103028.

Sun, B., Xiao, W., Feng, X., Shao, Y., Zhang, W., & Li, W. (2020). Behavioral and brain synchronization differences between expert and novice teachers when collaborating with students. *Brain and Cognition*, *139*, 105513.

Sun, B., Xiao, W., Lin, S., Shao, Y., Li, W., & Zhang, W. (2021). Cooperation with partners of differing social experience: An fNIRS-based hyperscanning study. *Brain and Cognition*, *154*, 105803.

Sun, H.-L., Sun, T., Sha, F.-Y., Gu, X.-Y., Hou, X.-R., Zhu, F.-Y., & Fang, P.-T. (2022). The influence of teacher–student interaction on the effects of online learning: Based on a serial mediating model. *Frontiers in Psychology*, *13*, 779217.

Takeuchi, N., Mori, T., Suzukamo, Y., & Izumi, S. I. (2017). Integration of teaching processes and learning assessment in the prefrontal cortex during a video game teaching-learning task. *Frontiers in Psychology*, *7*, 2052.

Takeuchi, N., Mori, T., Suzukamo, Y., & Izumi, S. I. (2019). Activity of prefrontal cortex in teachers and students during teaching of an insight problem. *Mind, Brain, and Education*, *13*(3), 167–175.

Thepsoonthorn, C., Yokozuka, T., Miura, S., Ogawa, K., & Miyake, Y. (2016). Prior knowledge facilitates mutual gaze convergence and head nodding synchrony in face-to-face communication. *Scientific Reports, 6*(1), 38261.

Wagner, J. C., Zinos, A., Chen, W.-L., Conant, L., Malloy, M., Heffernan, J., Quirk, B., Sugar, J., Prost, R., Whelan, J. B., Beardsley, S. A., & Whelan, H. T. (2021). Comparison of whole-head functional near-infrared spectroscopy with functional magnetic resonance imaging and potential application in pediatric neurology. *Pediatric Neurology*, *122*, 68–75.

Wang, X., Lu, K., He, Y., Gao, Z., & Hao, N. (2022). Close spatial distance and direct gaze bring better communication outcomes and more intertwined neural networks. *NeuroImage*, *261*, 119515.

Wass, S. V., Clackson, K., Georgieva, S. D., Brightman, L., Nutbrown, R., & Leong, V. (2018). Infants' visual sustained attention is higher during joint play than solo play: Is this due to increased endogenous attention control or exogenous stimulus capture? *Developmental Science*, *21*(6), e12667.

Wolff, C. E., van den Bogert, N., Jarodzka, H., & Boshuizen, H. P. A. (2015). Keeping an eye on learning: Differences between expert and novice teachers' representations of classroom management events. *Journal of Teacher Education*, *66*(1), 68–85.

Wróbel, M., & Imbir, K. K. (2019). Broadening the perspective on emotional contagion and emotional mimicry: The correction hypothesis. *Perspectives on Psychological Science*, *14*(3), 437–451.

Xu, J., Wainio-Theberge, S., Wolff, A., Qin, P., Zhang, Y., She, X., Wang, Y., Wolman, A., Smith, D., Ignaszewski, J., Choueiry, J., Knott, V., Scalabrini, A., & Northoff, G. (2023). Culture shapes spontaneous brain dynamics-shared versus idiosyncratic neural features among Chinese versus Canadian subjects. *Social Neuroscience*, *18*(5), 312–330.

Zhang, D., Wang, J., Zhao, J., Chen, S., Huang, Y., & Gao, Q. (2020). Impact of depression on cooperation: An fNIRS hyperscanning study. *Acta Psychologica Sinica*, *52*(5), 609–622.

Zheng, L., Chen, C., Liu, W., Long, Y., Zhao, H., Bai, X., Zhang, Z., Han, Z., Liu, L., Guo, T., Chen, B., Ding, G., & Lu, C.. (2018). Enhancement of teaching outcome through neural prediction of the students' knowledge state. *Human brain mapping*, *39*(7), 3046–3057.

Zheng, L., Liu, W., Long, Y., Zhai, Y., Zhao, H., Bai, X., Zhou, S., Li, K., Zhang, H., Liu, L., Guo, T., Ding, G., & Lu, C. (2020). Affiliative bonding between teachers and students through interpersonal synchronisation in brain activity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *15*(1), 97–109.

Zhu, Y., Leong, V., Hou, Y., Zhang, D., Pan, Y., & Hu, Y. (2022). Instructor-learner neural synchronization during elaborated feedback predicts learning transfer. *Journal of Educational Psychology*, *114*(6), 1427–1441.

Brain-to-brain synchronyduring teacher-student interactions and its regulatory factors in teaching interaction

GONG Fangying, SUN Yifan, HE Qin, SHI Ke, LIU Wei, CHEN Ning

(College of Psychology, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Teaching interaction is the core social psychological process of classroom teaching, and this paper focuses on three specific forms of teaching interaction: verbal, non-verbal and mixed interactions. It is found that the synergy of metacognitive processing, theory of mind, working memory, language processing and emotion and other related brain areas form the neural basis of teaching interaction. Interpersonal Brain Synchronization (IBS) plays an important role as a neural marker in identifying effective teaching interactions. It is regulated by many factors such as teaching ability, teaching strategy, prior knowledge and emotion. Future research directions should focus on refining the common and specific neural mechanisms of these three types of teaching interactions, further investigating other moderators of IBS, and emphasizing the ecological validity of teaching research in terms of research design and methodological extension to accurately reflect the realities of teaching practice.

Keyword: teaching interaction, cognitive neural mechanism, interpersonal brain synchronization, moderating factors